Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 161-171

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۱۷۱-۱۶۱

مقاله علمی-پژوهشی

# شبیه‌سازی و ارزیابی حرکت قایق ربات خودران

حمید عبدالملکی[۱]، علی جعفری[۲*]، حسین موسی‌زاده[۳]، علی حاجی‌احمد[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

## چکیده

با توجه به نیاز بیشتر جمعیت رو به افزایش جهان به مواد غذایی، محققان به دنبال افزایش تولید کمی و کیفی محصولات با گرایش به سمت پایش برخط، کنترل هوشمند تجهیزات و بررسی کیفیت محصولات کشاورزی به‌خصوص در زمینه پرورش آبزیان هستند. در این پژوهش شبیه‌سازی یک قایق خودران مدل انجام شده است تا کنترل این نوع از شناورها را در محیط‌های مختلفی مانند اسکله‌ها، سدها، بنادر، رودخانه‌ها، زیست‌بوم‌های آبی و مزارع پرورش آبزی انجام داده و امکان بررسی و پایش وضعیت زیست‌محیطی، عمق آب و شاخصه‌های مورد نیاز دیگر را فراهم آورد. موقعیت و زاویه حرکت قایق با استفاده از داده‌های GPS و IMU تعیین شده است. مدل سیالاتی و نیرویی قایق به کمک ضرایب هیدرودینامیکی و آئرودینامیکی ارائه و در محیط متلب به کمک رانگ کوتای کلاسیک (RK4) شبیه‌سازی شده است. برای ارزیابی عملکرد قایق ربات خودران، یک مسیر مستطیل شکل با طول ۲۰ متر در عرض ۱۵ متر در یک استخر انتخاب شد و ۴ گوشه این مستطیل به‌عنوان نقطه مسیر به سامانه ناوبری معرفی گردید. بیشینه خطای موقعیت مکانی عرضی و طولی قایق ربات خودران به‌ترتیب ۱۳۵ cm و ۱۴۹ cm محاسبه شد. همچنین در آزمون کنترلر PID سرعت پیشروی با سرعت تنظیمی ۴۰ $cm\ s^{-1}$ میانگین و انحراف معیار به‌ترتیب ۴۰ $cm\ s^{-1}$ و ۲ $cm\ s^{-1}$ به‌دست آمد. مسیر حرکت قایق تقریباً بر روی مسیر شبیه‌سازی شده قرار داشت و نتایج به‌دست آمده از دقت خوب این مدل حکایت دارد.

**واژه‌های کلیدی:** سامانه موقعیت‌یاب جهانی، شبیه‌سازی سیالاتی، قایق ربات خودران، مزرعه پرورش آبزیان، واحد اندازه‌گیری ماند

## مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت جهان و به‌تبع آن نیاز به تولید بیشتر مواد غذایی، متخصصین و پژوهشگران به دنبال افزایش تولید کمی و کیفی محصولات کشاورزی هستند. یکی از نیازهای این فرآیند، توسعه روش‌های پایش و بررسی کیفیت و سلامت این محصولات است. به همین دلیل در سالیان گذشته در سایه توسعه مکانیزاسیون و اتوماسیون کشاورزی، اکثر خوراکی‌ها و موارد مورد مصرف انسان در محیط‌های کنترل‌شده یا بسته، تولید می‌شوند. دلایل رغبت کشاورزان در این زمینه را می‌توان کاهش هزینه تولید، نیاز به نیروی کار کمتر، افزایش کیفیت محصولات و تولید حسگرها و عملگرهای پیشرفته‌تر عنوان کرد.

امروزه با ساخت مزارع پرورش ماهی، به‌عنوان یک منبع غنی غذایی، به دنبال دستیابی به تولید محصول بیشتر، سود بالاتر، افزایش کیفیت و کمیت هستند. در این مزارع میزان املاح مؤثر بر کیفیت آب همچون آمونیوم و نیترات، سطح pH، مقدار اکسیژن محلول در آب، وضعیت دما، کدری و سنجش سطح آب استخر، از مواردی است که باید مورد مطالعه قرار گرفته شود و با توجه به این مقادیر دستورهای مناسب را به عملگرها (پمپ‌ها، دریچه‌ها و غیره) ارسال کرد. با استفاده شناورهای سطحی خودران، می‌توان بر شرایط محیطی مزارع پرورش آبزیان نظارت دائمی و دقیقی داشت و پارامترهای مختلف را برای کاهش تلفات و افزایش ظرفیت تولید به‌صورت برخط بررسی کرد. این شناورها به‌طور گسترده‌ای در رشته‌های مختلف علمی همچون هیدروگرافی (Mousazadeh *et al.*, 2017) و در بسیاری از تحقیقات نظامی و رباتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند و ناوبری خودران آن‌ها، از نظر علمی و عملی، زوایای نهفته و جذابی را دارد (Mousazadeh *et al.*, 2018).

پایش کیفیت مزارع پرورش ماهی با استفاده از قایق‌های پارویی مرسوم تک‌نفره انجام می‌شود. در مواردی که بستر رودخانه از عمق پروانه قایق بزرگ‌تر است و گیاهان آبزی در سطح آنجا وجود ندارد استفاده از پروانه در زیر آب روشی مرسوم است. در مواردی که عمق

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۲- استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۳- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۴- استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
(* - نویسنده مسئول: Email: Jafarya@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v11i2.78325

آب کم است و در مناطق باتلاق مانند دارای گیاهان سطحی، از قایق‌های پارویی استفاده می‌شود. در مواردی که سرعت باد بیشتر از ۵ متر بر ثانیه باشد هدایت این‌گونه از قایق‌ها به سمت هدف، کاری سخت است (Kaizu *et al.*, 2011).

امروزه انواع مختلف شناورهای سطحی خودران برای اهداف نظامی، جغرافیایی و کشاورزی ساخته شده است و طی سالیان گذشته به سمت خودران شدن پیش رفته است. در اوایل دهه ۱۹۲۰ با استفاده از قطب‌نما برای اندازه‌گیری جهت پیشروی و یک کنترلر PID شناور در مسیر صحیح قرار می‌گرفت. بعد از معرفی سامانه موقعیت‌یاب جهانی در دهه ۱۹۷۰ اطلاعات موقعیت باعث افزایش دقت در کنترلر در یک مسیر پیش‌فرض، گردید (Minorsky, 1922). در پژوهش صورت گرفته توسط (Goli *et al.*, 2014) تلفیق داده‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی ( Global Positioning System- GPS) و واحد اندازه‌گیری ماند ( Inertial Measurement Unit-IMU) به کمک فیلتر کالمن دقت مناسبی را نسبت به روش‌های دیگر به همراه داشت.

در پژوهشی که توسط (Im and Nguyen, 2017) انجام شد، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای بررسی و کنترل پهلو گرفتن یک کشتی ۱۰۳ متری در بنادر مختلف بدون بازآموزش، موفقیت‌آمیز گزارش شد. از یک USV دارای RTK-GPS با دقت عمودی بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر برای ایجاد نقشه سه‌بعدی یک منطقه ۲۸۰ کیلومترمربعی محل سکونت صدف خوراکی در سواحل آمریکا استفاده گردید (Twichell *et al.*, 2007). یک هواقایق نیمه خودران را برای اندازه‌گیری عمق لایه لجن دریک مرداب با استفاده از DGPS و سونار کنار اسکن استفاده کردند (Singh *et al.*, 2008). در تحقیق دیگری، (Singh *et al.*, 2007) یک هواقایق ربات کوچک حدوداً ۹۰ سانتی را برای تعیین میزان کیفیت یک رودخانه کوچک در کالیفرنیای آمریکا ساختند. این قایق خودران بوده از GPS و قطب‌نما استفاده می‌کرد و وظیفه برداشت اطلاعات از ۱۰ بویه (Buoy) مختلف را بر عهده داشت. (Li and Weeks, 2009) از یک شناور سطحی خودران برای اندازه‌گیری جریان آب و تحلیل ادی (Eddy) استفاده کردند. (Lee *et al.*, 2010) بعد از شبیه‌سازی یک قایق در متلب و سیمولینک، از داده‌های به‌دست‌آمده برای بررسی صحت عملکرد کنترلرهای PID بر روی قایق خودران ۴ متری استفاده نمودند و نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را مثبت اعلام کردند. در این قایق با چرخاندن بدنه موتور، جهت‌گیری لازم صورت می‌گرفت. یکی دیگر از پژوهش های مربوط به ساخت هواقایق‌ها برای پایش برخط کیفیت آب دریاچه‌ها، قایقی به نام وکتور (Vector) مربوط به کشور برزیل است (Melo *et al.*, 2019). این قایق ۱۱۰ سانتی‌متری با بدنه V شکل، قابلیت اندازه‌گیری pH، اکسیژن حل شده در آب، دمای آب و محیط و غیره را دارد. یکی از تفاوت‌های این قایق نسبت به مدل‌های قبلی، بنابر اظهار خود پژوهشگران، قابلیت تعیین و خلق مسیر در نقشه با استفاده از موس است. این قایق از هیچ الگوریتم تلفیقی برای بهبود تخمین موقعیت استفاده نکرده و شعاع منطقه هدف را ۵ متر و با نرخ به‌روزرسانی ۱ هرتز در نظر گرفته بود. همچنین از روشی ساده برای تغییر جهت با استفاده از سکانی که درون آب قرار داده شده بود، استفاده می‌کرد.

هدف این مقاله شبیه‌سازی سامانه هدایت و ناوبری یک قایق ربات خودران بر اساس رانگ کوتای درجه چهار برای تهیه نقشه تغییرات شاخص‌های کیفی آب در یک مزرعه پرورش ماهی و ارزیابی آن است. قایق موردنظر دارای موتور هوایی با قدرت کمتر و درنتیجه سرعت کمتری نسبت به نوع آبی آن است. نبود پروانه در زیر آب از درگیری با گیاهان سطح آب و برخورد با آبزی جلوگیری می‌کند. همچنین از به هم خوردن و تلاطم آب در مناطق باتلاقی و کم‌عمق و ایجاد آب گل‌آلود جلوگیری خواهد نمود که امری ضروری برای بررسی مطالعات زیست‌شناسی است.

## مواد و روش‌ها

### قایق ربات خودران

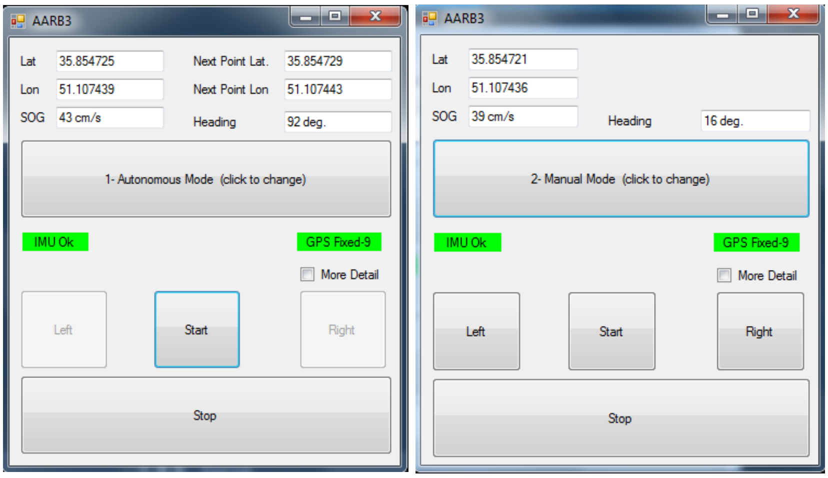
برای رسیدن به هدف این پژوهش، یک قایق خودران برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری از آب یک استخر پرورش ماهی واقع در شهر کرج، طراحی و ساخته شد (شکل ۱). این قایق ربات خودران همه‌منظوره با ابعاد ۱۱۰ در ۳۷ در ۴۰ سانتی‌متر و با بدنه تریماران قابلیت نصب ابزار و حسگرهای مختلفی را دارد و می‌تواند انتقال و دسترسی برخط و سریع‌تر داده‌های ضروری را ممکن سازد. سامانه رانش و پروانه‌های این قایق از نوع هوایی به کمک موتور براشلس (Emax 2213 995kv) است که بیشینه سرعت ۱۲۵ سانتی‌متر بر ثانیه را (در سرعت دورانی ۶۸۵۰ دور در ثانیه) فراهم می‌کند و قایق قابلیت رسیدن به شعاع دوران کمتر از ۶۱ سانتی‌متری را نیز دارد. انتقال اطلاعات ضروری و مورد نیاز کاربر به‌صورت برخط با استفاده از اینترنت اشیا، گوشی هوشمند، پیامک و رایانه در قایق میسر است. با توجه به طولانی بودن بحث فیلتر کالمن مورد استفاده برای بهبود دقت موقعیت مکانی به پژوهش صورت گرفته توسط ( Goli *et al.*, 2014) رجوع گردد.



**شکل ۱**– قایق ربات خودران طراحی‌شده

**Fig.1.** The autonomous robotic airboat used in the experiments

از یک دوربین کوچک در جلوی قایق برای مشاهده محیط اطراف قایق استفاده شد. برد اصلی کنترل عملگرهای قایق، شامل سرعت موتور و زاویه سکان، APM 2.8 بود. برای کنترل از راه دور قایق از ۴ حالت دورفرمان با برد ۲ کیلومتر، با گوشی هوشمند با برد ۱۰ متر، با جوی استیک با برد ۱۰ متر و از دفتر کار با برد ۱۵۰۰ متر استفاده گردید. رابط گرافیکی مورد استفاده برای تعیین روش ناوبری، نقطه شروع، زمان شروع حرکت، موقعیت و سرعت قایق ربات خودران در شکل ۲ نشان داده شده و از ماژول NRF24L01 برای ارسال/دریافت داده به/از قایق استفاده شده است. برای راه‌اندازی موتور براشلس از یک باتری لیتیوم پلیمر سه سل با ظرفیت ۲۲۰۰ میلی‌آمپرساعت، کنترل سکان از یک موتور سروو مدل ۹۵۵، دریافت اطلاعات موقعیت و سرعت از یک GPS مدل UBlox-M8N با دقت بهتر از ۲/۵ متر (۹۵٪) و فرکانس ۵ هرتز، راستای قایق با دقت ۰/۱ درجه از ماژول GY-86 IMU و با کمک فیلتر کالمن استفاده شد و یک دوربین ۲ مگا پیکسلی برای مشاهده وضعیت استخر در جلوی قایق قرار داده شد.

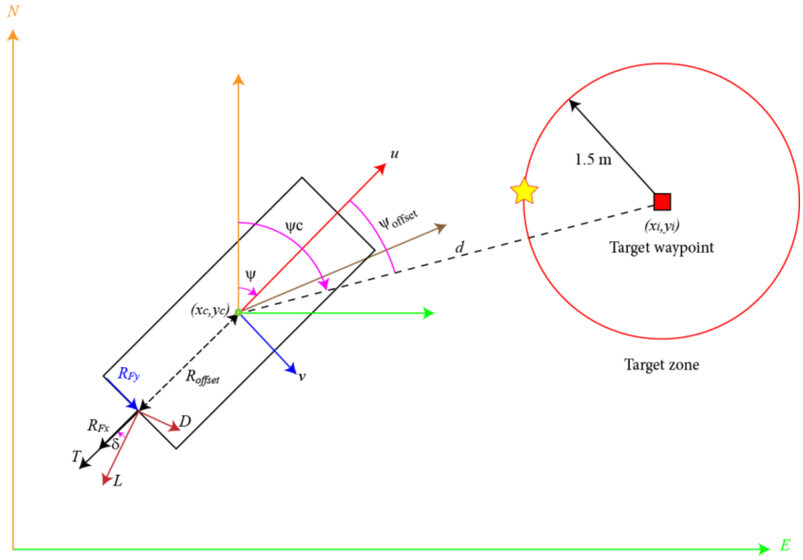



**شکل ۲**– نرم‌افزار ناوبری قایق ربات با استفاده از رایانه (نوشته شده در نرم‌افزار C#)

**Fig.2.** The navigation software using C# programming language

## روش‌های کنترل

با توجه به این‌که قایق ربات خودران سرعت کمی دارد و در آب بدون تلاطم و آرام حرکت می‌کند، می‌توان با نادیده گرفتن اثرات موج، معادله حرکت قایق را در صفحه و دوبعدی در نظر گرفت؛ که تنها سه مولفه، مختصات وسیله در مرکز جرم و جهت‌گیری آن، برای بررسی حرکت این شناور سطحی مورد نیاز است. در شکل ۳ مختصات قایق نشان داده شده است. با استفاده از کنترلرهای PID سرعت قایق و جهت پیشروی در حد مورد نظر نگه داشته می‌شد.




**شکل ۳**– مختصات دوبعدی قایق

**Fig.3.** 2D position of the autonomous robotic boat

بردار حالت قایق شامل ۶ پارامتر است (رابطه ۱).

$$xState_k = [x, y, \psi, u, v, r] \quad (۱)$$

با استفاده از رابطه (۲) زاویه بین خط واصل قایق و نقطه مسیر، نسبت به محور شمال، به‌دست می‌آید.

$$\psi_c = a\tan2(y_i - y_c, x_i - x_c) \quad (۲)$$

برای تعیین میزان اختلاف بین راستای حرکت قایق و راستای مورد نظر از رابطه (۳) کمک گرفته می‌شود.

$$\psi_{offset} = a\tan2(\sin(\psi)\cdot\cos(\psi_c) - \cos(\psi)\cdot\sin(\psi_c), \cos(\psi)\cdot\cos(\psi_c) + \sin(\psi)\cdot\sin(\psi_c)) \quad (۳)$$

در صورتی‌که قایق وارد منطقه هدف (دایره‌ای به شعاع ۱/۵ متر به مرکزیت نقطه مسیر) شود الگوریتم حرکت، سراغ نقطه مسیر بعدی خواهد رفت. این فاصله از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$d = \sqrt{(y_i - y_c)^2 + (x_i - x_c)^2} \quad (۴)$$

از کنترلر PID برای کنترل بهینه زاویه سکان استفاده می‌شود و کنترلر باید برای رساندن قایق به نقطه موردنظر (رابطه ۵)، راستای حرکت قایق را تنظیم نماید. محدوده تغییر زاویه سکان بین ۴۵+ درجه و ۴۵− درجه است.

$$dr = P_\psi \cdot \psi_{offset} + D_\psi \cdot (rc - r) \quad (۵)$$

سرعت حرکت قایق نیز باید با استفاده از یک کنترلر PID دیگر ثابت نگه داشته شود. بردار ورودی (رابطه ۶)، شامل دو پارامتر میزان تغییر در زاویه سکان و درصد چرخش موتورهای بدون جاروبک است.

$$u_k = [dr, dt] \quad (۶)$$

**مدل سیالاتی**

در ادامه، روابط مورد نیاز برای محاسبه مشتق تمام متغیرهای بردار حالت آورده می‌شود. با مشتق گرفتن از موقعیت، سرعت در جهت x و y به‌ترتیب از رابطه (۷) و رابطه (۸) به‌دست می‌آید. این دو رابطه مولفه‌های سرعت در مختصات بدنه را به مولفه‌های سرعت در مختصات اینرسی تبدیل می‌کند.

$$\dot{x} = u\cdot\cos(\psi) - v\cdot\sin(\psi) \quad (۷)$$

$$\dot{y} = v\cdot\cos(\psi) + u\cdot\sin(\psi) \quad (۸)$$

برای ساده‌سازی و بر اساس تئوری مومنتم (Escudier, 2018) مقدار تراست موتور بدون جاروبک (براشلس) یا نیروی پیش‌برنده، تابعی است از چگالی هوا، سطح مقطع پروانه و سرعت جریان هوای ایجادشده توسط پروانه (رابطه ۹). تابع این سرعت برحسب سرعت چرخش پروانه، با استفاده از بادسنج به‌دست می‌آید.

$$T = 2\cdot\rho\cdot A_p\cdot u_i^2 \quad (۹)$$

سرعت هوا بر روی سکان و در جهت طول قایق، از مجموع سرعت جریان هوای عبوری و سرعت قایق (رابطه ۱۰) و سرعت هوا بر روی سکان در جهت عرض قایق، از (رابطه ۱۱) به‌دست خواهد آمد.

$$u_r = u + u_i \quad (۱۰)$$

$$v_r = v - r\cdot R_{offset} \quad (۱۱)$$

زاویه کلی حمله سکان از رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) و مربع سرعت در سکان از رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید.

$$\delta = a\tan(v_r, u_r) \quad (۱۲)$$

$$\delta_R = a\tan(v_r, u_r) + dr \quad (۱۳)$$

$$V_R^2 = u_r^2 + v_r^2 \quad (۱۴)$$

به کمک رابطه (۱۵) و رابطه (۱۶) به‌ترتیب نیروهای برآ و پسا محاسبه خواهند شد (Escudier, 2018).

$$L = 0.5 \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot A_R \cdot C_{la} \cdot \delta_R \quad (۱۵)$$

$$D = 0.5 \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot A_R \cdot (C_{d0} + C_{da} \cdot \delta_R^2) \quad (۱۶)$$

برای نگاشت نیروها به مختصات بدنه داریم:

$$R_{Fx} = -\cos(\delta) \cdot D + \sin(\delta) \cdot L \quad (۱۷)$$

$$R_{Fy} = -\sin(\delta) \cdot D - \cos(\delta) \cdot L \quad (۱۸)$$

با در نظر گرفتن اصطکاک حاصل از حرکت قایق در آب، مجموع نیروها در راستای محور x از رابطه (۱۹) و در راستای محور y از رابطه (۲۰) به‌دست می‌آید.

$$F_x = R_{Fx} + T - C_f \cdot u \quad (۱۹)$$

$$F_y = R_{Fy} - C_s \cdot v \quad (۲۰)$$

با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

$$\dot{u} = r \cdot v + F_x / m \quad (۲۱)$$

$$\dot{v} = -r \cdot u + F_y / m \quad (۲۲)$$

برای محاسبه مشتق دوم سرعت زاویه‌ای (رابطه ۲۴) مومنت وارد شده (رابطه ۲۳) به قایق نیاز است.

$$N = C_r \cdot r - R_{offset} \cdot R_{Fy} \quad (۲۳)$$

$$\dot{r} = N / I_{zz} \quad (۲۴)$$

### رانگ کوتای کلاسیک

یکی از روش‌های مهم و دقیق‌تر نسبت به روش‌های اویلری یا حتی اویلری پیشرفته (مانند روش هن) روش رانگ کوتای کلاسیک درجه ۴ است (Kreyszig *et al.*, 2011). در هر گام اجرای این روش ۴ کمیت کمکی ($k_1, k_2, k_3, k_4$) محاسبه شده سپس مقدار متغیر موردنظر به‌دست خواهد آمد (رابطه ۲۵ تا رابطه ۳۲). با توجه به اینکه این روش به هیچ رویه آغاز ویژه‌ای نیاز ندارد، حجم محاسباتی کمی لازم دارد و مکرراً از یک روش مشخص و ساده استفاده می‌کند؛ معمولاً به‌راحتی در برنامه‌های رایانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش از نظر عددی پایدار است.

$$k = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}] \quad (۲۵)$$

$$k_1 = DD\ (t_k, x_k, u_k) \quad (۲۶)$$

$$k_2 = DD\ (t_k + t_{step}/2, x_k + k_1 \cdot t_{step}/2, u_k) \quad (۲۷)$$

$$k_3 = DD\ (t_k + t_{step}/2, x_k + k_2 \cdot t_{step}/2, u_k) \quad (۲۸)$$

$$k_4 = DD\ (t_k + t_{step}, x_k + k_3 \cdot t_{step}, u_k) \quad (۲۹)$$

$$\phi = (1/6) \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \quad (۳۰)$$

$$xState_{k+1} = xState_k + \phi \cdot t_{step} \quad (۳۱)$$

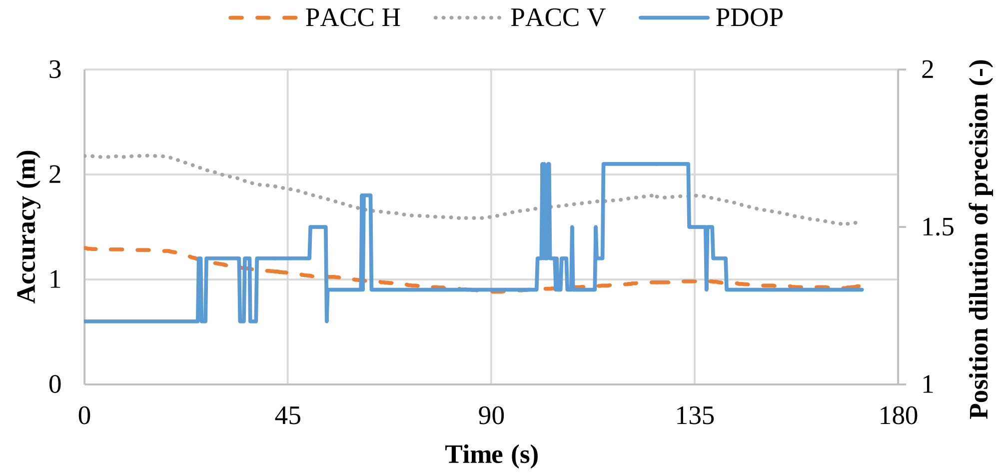
$$uState_{k+1} = uState_k \quad (۳۲)$$

### شبیه‌سازی

با استفاده از نرم‌افزار متلب و محیط دستورنویسی آن، شبیه‌سازی قایق با استفاده از روابط ذکرشده در قسمت قبل صورت پذیرفت و از روش دستی ضرایب کنترلرهای PID تخمین زده شد. با توجه به استخر پرورش مورد نظر واقع در کرج و ابعاد مفید ۲۰ متر در ۱۵ متر، به‌ترتیب چهار نقطه از شماره ۱ تا ۴ و با مختصات (۰,۰)، (۲۰,۰)، (۲۰,۱۵) و (۰,۱۵) در استخر مشخص شد. هدف قایق ربات خودران رفتن از نقطه شروع به نقطه‌های بعدی است. زمانی که قایق به فاصله ۱/۵ متری نقطه هدف می‌رسد، نقطه بعدی به‌عنوان هدف معرفی خواهد شد. نقطه تنظیمی سرعت قایق، ۰/۴ متر بر ثانیه و بردار شروع حرکت (بردار صفر) [ ۰، ۰، ۰، ۹۰، ۰، ۰ ] در نظر گرفته شد.

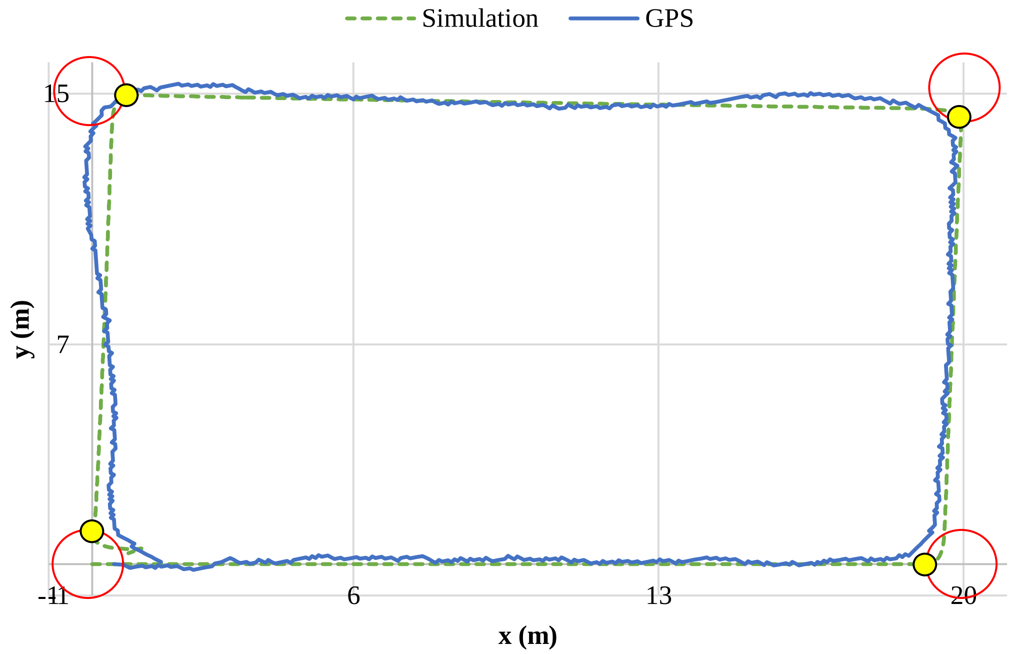
## نتایج و بحث

مولفه‌های دقت افقی، عمودی و موقعیت (PACC H، PACC V و PDOP) در طول آزمون نشان‌دهنده دقت بسیار خوب GPS است (شکل ۴). مقدار PDOP همواره زیر عدد ۲ و دقت افقی حدود ۱ متر است. در شکل ۵، مسیر شبیه‌سازی‌شده و واقعی (داده GPS) حرکت قایق به مدت حدود ۱۸۰ ثانیه، مناطق هدف (دایره توخالی قرمزرنگ)، ۴ نقطه مسیر و محل رسیدن به نقاط هدف در یک استخر به مساحت ۳۰۰ مترمربع نمایش داده شده و ضرایب کنترلرهای PID نیز در جدول ۱ آورده شده است.




**شکل ٤** – مولفه‌های دقت GPS

**Fig.4.** GPS accuracy parameters




**شکل ۵**– موقعیت قایق ربات خودران

**Fig.5.** Local location of the boat

**جدول ۱**– ضرایب PID

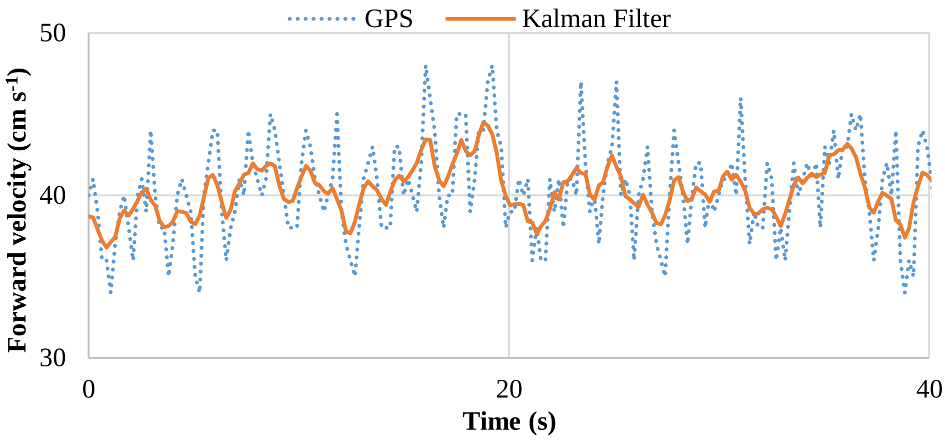
**Table 1**- PID gains

| کنترلر<br>**Control parameter** | ضریب P<br>$K_P$ | ضریب I<br>$K_I$ | ضریب D<br>$K_D$ |
|---|---|---|---|
| سرعت پیشروی<br>Forward speed | 140.54 | 11.91 | 0.0003 |
| جهت حرکت<br>Heading | 8.1 | 4.65 | 0.04 |

**جدول ۲**– مقادیر قدرمطلق خطا بین متغیرهای آماری مدل شبیه‌سازی‌شده و داده‌های واقعی
**Table 2**- Absolute error of simulation and real data

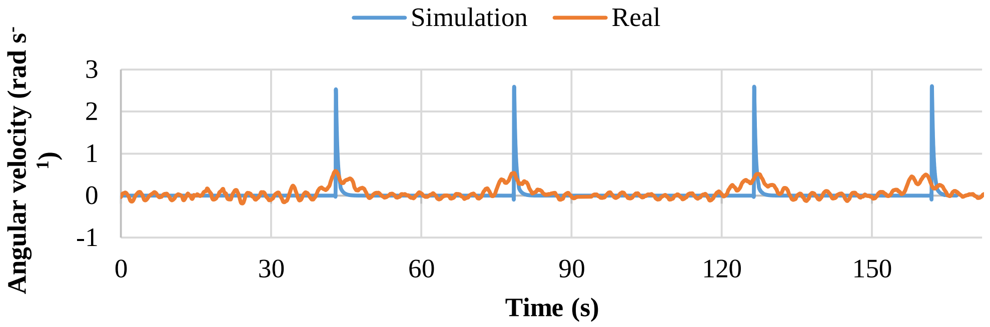
| متغیر Parameter | واحد Unit | بیشترین Maximum |
|---|---|---|
| موقعیت طولی Local position (x) | m | 1.49 |
| موقعیت عرضی Local position (y) | m | 1.35 |
| راستای قایق Heading | ° | 39 |
| سرعت زاویه‌ای Angular velocity | rad $s^{-1}$ | 2 |
| سرعت پیشروی Forward speed | cm $s^{-1}$ | 3.1 |

با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از فیلتر کالمن در مورد موقعیت مکانی می‌توان به دقت زیر ۳۵ سانتی‌متر نیز رسید (Goli *et al.*, 2014) که در مقالات بعدی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته امکان بهبود کیفیت در قایق ربات خودران، بررسی خواهد شد. در شکل ۶ نمودار سرعت پیشروی برای بررسی عملکرد کنترلر PID سرعت نشان داده شده است. میانگین و انحراف معیار سرعت با استفاده از این کنترلر ۰/۴۰ و ۰/۰۲ متر بر ثانیه محاسبه شد.




**شکل ٦**– سرعت پیشروی ۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه در آزمون قایق ربات خودران
**Fig.6.** Performance of forward speed PID controller (40 cm $s^{-1}$)

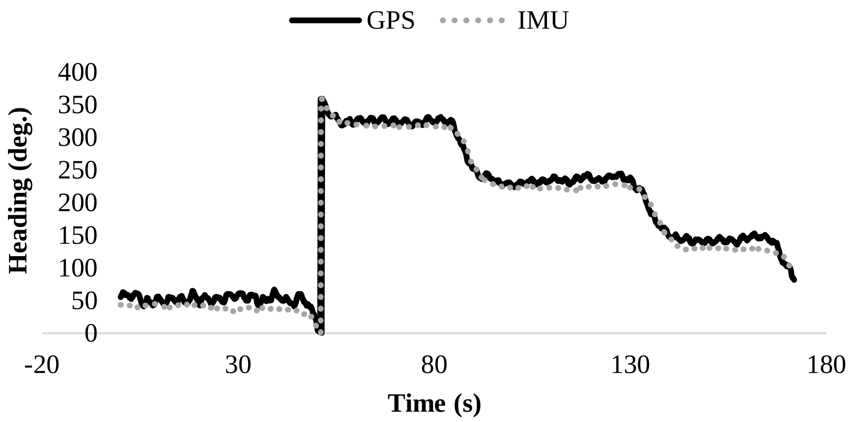
موقعی که قایق به منطقه هدف می‌رسد، سکان قایق بلافاصله عکس‌العمل نشان داده و قایق سرعت زاویه‌ای و جانبی را تجربه می‌کند (شکل ۷). با دوران قایق راستای قایق تغییر کرده، مقداری از سرعت پیشروی قایق کم شده به قدر مطلق سرعت جانبی اضافه شود. کنترلر سرعت برای جبران کاهش سرعت پیشروی دور موتور براشلس را زیاد می‌کند. اگر مقدار تغییر زاویه سکان زیاد باشد، حتی با بیشینه شدن سرعت موتور براشلس، کاهش سرعت پیشروی جبران نخواهد شد. در شکل ۷ می‌توان زمان رسیدن قایق ربات خودران را به ۴ نقطه هدف، با توجه به نقاط "۸" مانند مشاهده نمود. باید توجه داشت تغییرات شدید در سرعت دورانی و جانبی در مواردی که انسان در شناورها وجود ندارد مشکلی را ایجاد نمی‌کند. در غیر این صورت باید با تغییر شعاع منطقه هدف و تصحیح ضرایب کنترلر، بیشینه و کمینه سرعت دورانی را لحاظ نمود. در این‌گونه موارد سرعت میانگین همواره با اختلاف بسیار کمتری برابر با سرعت تنظیمی خواهد بود. با توجه به این‌که حرکت قایق ربات خودران از نقطه ۱ شروع شده و در مسیر مستقیم حرکت می‌کند، بعد از رسیدن به منطقه هدف دوم، راستای قایق زاویه بیشتری نسبت به مسیر مورد نظر تا نقطه بعدی دارد که باعث افت بیشتر سرعت نسبت به نقاط دیگر می‌شود. حتی با وجود این نقاط، اختلاف حدود ۴ درصدی با نقطه سرعت تنظیمی از عملکرد خوب کنترلر سرعت حکایت دارد. برای غلبه بر این افت سرعت می‌توان از موتورهای بزرگ‌تر استفاده نمود.




**شکل ۷**– سرعت زاویه‌ای آزمون دور کامل

**Fig.7.** Angular velocity of the boat during the loop test (4 points)

بیشترین اختلاف بین زاویه به‌دست‌آمده از فیلتر کالمن و زاویه دریافتی از GPS، ۱۱ درجه است (شکل ۸) که این مقدار با توجه به دقت ۰/۳ درجه ای زاویه به‌دست آمده از GPS، نشانگر وجود زاویه لغزش جانبی در حرکت قایق و مقداری خطا در داده‌های GPS در لحظه موردنظر است. همچنین بیشترین مقدار اختلاف بین زاویه به‌دست‌آمده از فیلتر کالمن و زاویه محاسبه شده از روش شبیه‌سازی ۳۹ درجه است. باید توجه داشت که میانگین اختلاف این خطاها، در آزمون مسیر مستطیلی حدود صفر است. مولفه‌های مختلف سرعت پیشروی نیز در شکل ۹ به نمایش درآمده است. در صورت عدم نیاز به دقت بسیار بالا، داده‌های جهت‌گیری GPS دقت مطلوبی را فراهم خواهد کرد.




**شکل ۸**– زاویه حرکت در آزمون مسیر مستطیلی

**Fig.8.** Heading of the boat during the loop test

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی حرکت یک قایق ربات خودران خورشیدی انجام شد و با استفاده از یک قایق مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. از بین متغیرهای موقعیت طولی، موقعیت عرضی، زمان رسیدن به منطقه هدف، سرعت زاویه‌ای، راستای قایق و سرعت پیشروی؛ کمترین و بیشترین درصد خطای بیشینه به‌ترتیب مربوط به متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت زاویه‌ای است. این اعداد از عملکرد خوب و مناسب مدل شبیه‌سازی‌شده و کنترلرهای PID حکایت دارد. از قایق ساخته‌شده می‌توان به‌طور مطمئن در مزارع پرورش ماهی برای کنترل و پایش شرایط زیست‌محیطی و کیفیت آب استفاده نمود.

## سپاسگزاری

از همکاری جناب آقای دکتر علیمردانی عضو محترم هیئت‌علمی دانشگاه تهران کمال تشکر و سپاس را داریم. همچنین از داوران محترمی که با ارائه نظرات خود در بهبود کیفیت مقاله و رفع مشکلات آن ما را یاری دادند، متشکریم.

| Symbol | متغیر | Parameter | Value | Unit/Remarks |
|---|---|---|---|---|
| $\rho$ | چگالی هوا | Air density | 1.225 | kg $m^{-3}$ |
| $\psi$ | زاویه حرکت | Heading | – | deg. |
| $\delta$ | زاویه حمله سکان | Rudder angle of attack | – | deg. |
| $\varphi$ | ضریب | Constant | – | – |
| $\psi_c$ | زاویه بین خط واصل قایق و نقطه مسیر | Angle between target waypoint and boat | – | deg. |
| $\psi_{offset}$ | اختلاف راستای قایق و خط واصل | Angle between target waypoint and boat | – | deg. |
| $\delta_R$ | زاویه حمله کلی سکان | Total Rudder angle of attack | – | deg. |
| $A_p$ | مساحت پروانه | Propeller area | 0.05 | $m^2$ |
| $A_R$ | مساحت سکان | Rudder are | 0.03 | $m^2$ |
| b | طول قایق | Boat length | 1.1 | m |
| $C_{d0}$ | ضریب درگ | Drag coefficient | 0.3 | – |
| $C_{da}$ | ضریب لیفت | Lift coefficient | 5.7 | – |
| $C_f$ | ضریب جلو | Forward coefficient | 0.2 | – |
| $C_{la}$ | ضریب صفر درگ | Zero drag coefficient | 0.005 | – |
| $C_r$ | ضریب دوران | Rotational coefficient | 0.0075 | – |
| $C_s$ | ضریب کناری | Side coefficient | 0.26 | – |
| $D$ | نیروی پسا | Drag | – | N |
| $d$ | شعاع دایره منطقه هدف | Radius of target zone (circle) | 1 | m |
| $D_\psi$ | ضریب D کنترلر سکان | D term value of Rudder PID controller | – | - |
| $d_{prop}$ | قطر پروانه | Propeller Diameter | 10 | in |
| $dr$ | زاویه سکان | Rudder angle | – | deg. |
| $dt$ | درصد سرعت موتور براشلس | Percentage of throttle | – | ٪ |
| $F_x$ | نیروی طولی اعمالی به قایق | Longitudinal force of boat | – | N |
| $F_y$ | نیروی عرضی اعمالی به قایق | Lateral force of boat | – | N |
| $I_{zz}$ | ممان اینرسی قطبی | Moment of Inertia | – | $m^4$ |
| $k_{1-4}$ | ضرایب رانگ کوتا | RK coefficient | – | - |
| $L$ | نیروی برآ | Lift | – | N |
| $m$ | جرم قایق | Boat mas | 5 | kg |
| $N$ | گشتاور وارده به قایق | Exerted moment to boat | – | Nm |
| $P_\psi$ | ضریب P کنترلر سکان | P term value of Rudder PID controller | – | - |
| $P_{prop}$ | پیچ پروانه | Propeller Pitch | 4.5 | in |
| $r$ | سرعت زاویه‌ای | Angular velocity | – | deg $s^{-1}$ |
| $rc$ | سرعت زاویه‌ای موردنظر | Desired angular velocity | – | deg $s^{-1}$ |
| $R_{Fx}$ | نیروی طولی اعمالی به سکان | Longitudinal force in ruuder | – | N |
| $R_{Fy}$ | نیروی عرضی اعمالی به سکان | Lateral force in ruuder | – | N |
| $R_{offset}$ | فاصله سکان تا مرکز جرم | Offset between rudder and CG | 0.185 | m |
| $T$ | تراست | Thrust | – | N |
| $t_k$ | زمان | Time | – | s |
| $t_{step}$ | گام زمانی | Step time | – | s |
| $u$ | سرعت طولی | Longitudinal speed | – | m $s^{-1}$ |
| $u_i$ | سرعت هوای ایجادشده | Air velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $u_k$ | بردار ورودی | Input vector | – | - |
| $u_r$ | سرعت طولی در روی سکان | Longitudinal component of Air velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $v$ | سرعت عرضی | Lateral velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $v_r$ | سرعت عرضی هوا در روی سکان | Lateral component of Air velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $V_R$ | سرعت کلی هوا در روی سکان | Air velocity on rudder | – | m $s^{-1}$ |
| $VE$ | مولفه سرعت در جهت شرق | East component of velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $VN$ | مولفه سرعت در جهت شمال | North component of velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $VX$ | مولفه x سرعت | x component of velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $VY$ | مولفه y سرعت | y component of velocity | – | m $s^{-1}$ |
| $w$ | عرض قایق | Boat width | 0.37 | m |
| $x$ | موقعیت طولی | Local position (x) | – | m |
| $x_c$ | موقعیت طولی فعلی | Current local position (x) | – | m |
| $x_i$ | موقعیت طولی نقطه مسیر | Local position (x)of way point | – | m |
| $xState_k$ | بردار حالت در زمان $k$ | State vector at time $k$ | – | – |
| $y$ | موقعیت عرضی | Local position (y) | – | m |
| $y_c$ | موقعیت عرضی فعلی | Current local position (y) | – | m |
| $y_i$ | موقعیت عرضی نقطه مسیر | Local position (y) of way point | – | m |

## References


1. Escudier, M. 2018. Introduction to engineering fluid mechanics, Oxford University Press, Oxford.
2. Goli, H., S. Minaee, A. Jafari, A. Keyhani, A. Hajiahmad, H. Abdolmaleki, and A. Mohammad Borghaee. 2014. Comparison of four different methods for agricultural positioning using GPS and IMU. Journal of Agricultural Machinery 4 (2): 285-95. (In Farsi).
3. Im, N. K., and V. S. Nguyen. 2017. Artificial neural network controller for automatic ship berthing using head-up coordinate system. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.
4. Kaizu, Y., M. Iio, H. Yamada, and N. Noguchi. 2011. Development of unmanned airboat for water-quality mapping. Biosystems Engineering 109 (4): 338-47.
5. Kreyszig, E., H. Kreyszig, and E. J. Norminton. 2011. Advanced engineering mathematics, Wiley, [Hoboken, NJ].
6. Lee, S. D., C. H. Yu, K. Y. Hsiu, Y. F. Hsieh, C. Y. Tzeng, and Y. Z. Kehr. 2010. Design and experiment of a small boat track-keeping autopilot. Ocean Engineering 37 (2): 208-17.
7. Li, C. Y., and E. Weeks. 2009. Measurements of a small scale eddy at a tidal inlet using an unmanned automated boat. Journal of Marine Systems 75 1-2: 150-62.
8. Melo, M., F. Mota, V. Albuquerque, and A. Alexandria. 2019. Development of a Robotic Airboat for Online Water Quality Monitoring in Lakes. Robotics 8 1: 19.
9. Minorsky. N. 1922. Directional Stability of Automatically Steered Bodies. Journal of the American Society for Naval Engineers 34 (2): 280-309.
10. Mousazadeh, H., H. Jafarbiglu, H. Abdolmaleki, E. Omrani, F. Monhaseri, M. R. Abdollahzadeh, A. Mohammadi-Aghdam, A. Kiapei, Y. Salmani-Zakaria, and A. Makhsoos. 2018. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an Unmanned Surface Vehicle (USV) by algorithms fusion. Ocean Engineering 159: 56-65.
11. Mousazadeh, H., H. Jafarbiglu, E. Omrani, F. Monhaseri, A. Kiapei, Y. Salmani-Zakaria, and A. Makhsoos. 2017. Experimental evaluation of a hydrography surface vehicle in four navigation modes. Journal of Ocean Engineering and Science 2 (2): 127-36.
12. Singh, A., M. J. Stealey, V. Chen, W. J. Kaiser, M. Batalin, Y. Lam, B. Zhang, A. Dhariwal, C. Oberg, A. Pereira, G. S. Sukhatme, B. Stauffer, Moorthi Stefanie, D. Caron, and M. Hansen. 2007. Human assisted robotic team campaigns for aquatic monitoring. Journal of Field Robotics 24 11-12: 969-89.
13. Singh, K., J. Worley, and M. Risse. 2008. Sludge Measurement Using Global Positioning System (GPS) Enabled Sonar Equipped Airboat in a Lagoon. Applied Engineering in Agriculture 24 (5): 603-09.
14. Twichell, D. C., B. D. Andrews, H. L. Edmiston, and W. R. Stevenson. 2007. Geophysical mapping of oyster habitats in a shallow estuary; Apalachicola Bay, Florida, Apalachicola Bay, Florida. U.S. Geologicaln Survey Open-File Report.

**Journal of Agricultural Machinery**
**Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 161-171**

**نشریه ماشین‌های کشاورزی**
**جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۱۷۱-۱۶۱**

# Simulation, Development and Evaluation of an Autonomous Robotic Boat Used in Aquacultures

**H. Abdolmaleki[1], A. Jafari[2*], H. Mousazadeh[3], A. Hajiahmad[4]**

Received: 14-02-2019
Accepted: 19-06-2019

**Introduction**

As the world population grows up, the quantity and quality of human food must be improved. The production yield of marine aquaculture and farming of aquatic organisms, as a valuable source of food, will be increased. Regular and online monitoring of the physical, chemical, and biological qualities of water and environmental parameters in such these controlled environments can be achieved by using advanced world technologies, such as autonomous boats. In this study, simulation of an autonomous boat has been done to help better understanding and control of this type of vessel in various environments such as dams, ports, rivers, aquatic ecosystems, and aquaculture. Hence, the main goal of this paper is to simulate and evaluate the guidance and navigation system of an autonomous boat based on the Fourth order of Runge-Kutta for determining the changes of water quality indices in a fish farming ponds.

**Materials and Methods**

In order to achieve the main goal of this study, an autonomous boat was designed and built. This boat as a general-purpose robotic trimaran boat has dimensions of 110 cm x 37 cm x40 cm and is made of Plexiglas 2 mm thick. Maximum forward speed of the boat is 125 cm $s^{-1}$ (at 6850 rpm of brushless motors) and the turning radius is less than 61 cm. The environmental data can be transferred using Internet of Things (IOT), smartphones, SMS, and mini PC. The position and heading of the boat are determined using GPS and IMU data. The hydrodynamic and aerodynamic forces, moments, and coefficients of the boat model are determined and then applied in the mathematical simulation as the input of classic Runge-Kutta (RK4). The performance of the robotic boat navigational and control systems evaluated in a rectangular track with a length of 20 m and a width of 15 m in a fish farming pond in Karaj and 4 waypoints. The local coordinates of four corner of the mentioned rectangular in the pond was (0, 0), (0, 20), (15, 20), and (15, 0). The purpose of control system was to conduct the actuators in such way that boat be able to go to the next point. When the boat reaches the target distance of one m of the desired point, the next point will be introduced as a new target. The set point of boat speed was 0.4 m $s^{-1}$ and zero state vector was [0, 0, 0, 0, 0, 0].

**Results and Discussion**

The maximum error of position and heading of the autonomous boat is 135 cm and 11 degrees, respectively. Also, in the speed PID controller test (40 cm $s^{-1}$), the average and standard deviation of the speed calculated as 40 cm $s^{-1}$ and 2 cm $s^{-1}$, respectively. Maximum difference between the heading obtained from the Kalman filter and received from the GPS is 11 degrees. In some situations that high precision of heading angle is not required, the GPS data can provide such accuracy of the heading. Among the variables of longitudinal, latitude, time to reach the target area, yaw rate, heading, and forward speed the minimum and maximum of percentage error are related to forward speed and yaw rate, respectively. These values show good performance of the simulated model and PID controllers.

**Conclusions**

In this study, motion simulation and evaluation of a robotic boat was carried out using a model boat and MATLAB software. The mathematical model simulated the real boat behavior correctly and the boat can be used safely in fish farming ponds to monitor environmental conditions and water quality.

**Keywords:** Aquaculture farm, Autonomous robotic boat, Fluid simulation, GPS, IMU

1- PhD. Student of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran
2- Professor, Deparetment of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran
3- Associate Professor, Deparetment of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran
4- Assistant Professor, Deparetment of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran
(*- Corresponding Author Email: Jafarya@ut.ac.ir)